

Modélisation et simulation numériques en formage virtuel



Khemais Saanouni

hermes

Lavoisier

Table des matières

Préface de Jean-Louis Chaboche	15
Préface de Jean-Loup Chenot	17
Avant-propos	19
Khemais SAANOUNI	
Principe des notations utilisées	25
Chapitre 1. Eléments de mécanique et de thermodynamique des milieux continus	27
1.1. Eléments de cinématique et de dynamique des milieux continus matériellement simples	28
1.1.1. Transformation homogène et gradient de la transformation	28
1.1.1.1. Transformation homogène	28
1.1.1.2. Gradient de la transformation et son inverse	30
1.1.1.3. Décomposition polaire du gradient de la transformation	31
1.1.2. Transports de vecteurs, de surfaces et de volumes élémentaires	32
1.1.2.1. Transport d'un vecteur élémentaire	32
1.1.2.2. Transport d'un élément de volume. Dilatation volumique	32
1.1.2.3. Transport d'une surface élémentaire orientée	34

1.1.3. Diverses mesures des dilatations, des déformations et des taux des déformations 35

1.1.3.1. Sur quelques définitions des dilatations 35

1.1.3.2. Sur quelques définitions de tenseurs des déformations. 37

1.1.3.3. Tenseurs taux de déformation et taux de rotation 42

1.1.3.4. Taux de dilatation volumique, taux d'allongement relatif, taux de glissement angulaire 44

1.1.4. Diverses mesures des contraintes. 46

1.1.5. Conjugaison contraintes-déformations 50

1.1.6. Changement de référentiel ou de configuration et notion d'objectivité 51

1.1.6.1. Incidence sur les déformations et taux des déformations 52

1.1.6.2. Incidence sur les contraintes et taux des contraintes 54

1.1.6.3. Incidence sur les relations de comportement. 57

1.1.7. Décomposition de la déformation en parties réversibles et irréversibles. 57

1.2. Sur les lois de conservation de la physique des milieux continus matériellement simples. 61

1.2.1. Conservation de la masse. Equation de continuité. 61

1.2.2. Principe des puissances virtuelles. Equations d'équilibre 62

1.2.3. Principe de conservation de l'énergie. Premier principe de la thermodynamique 64

1.2.4. Inégalité de l'entropie. Second principe de la thermodynamique 65

1.2.5. Inégalités fondamentales de la thermodynamique. 66

1.2.6. Equation de la chaleur déduite de la conservation de l'énergie 67

1.3. Thermodynamique des milieux continus matériellement simples et nécessité des modèles de comportement 68

1.3.1. Nécessité de modèles de comportement. 68

1.3.2. Sur quelques propriétés fondamentales des équations de comportement 70

1.3.2.1. Principe de déterminisme ou de causalité 70

1.3.2.2. Principe de l'action locale. 70

1.3.2.3. Principe d'objectivité ou d'indifférence matérielle 71

1.3.2.4. Principe de respect des symétries matérielles 71

1.3.2.5. Principe de consistance 72

1.3.2.6. Admissibilité thermodynamique 72

1.3.3. Thermodynamique des processus irréversibles. 72

Méthode de l'état local. 73

1.3.3.1. Une présentation de la méthode de l'état local 73

1.3.3.2. Liaisons internes 81

1.4. Mécanique des milieux continus généralisés. 85

Théorie des milieux micromorphiques 85

1.4.1. Principe des puissances virtuelles pour les milieux micromorphiques. 87

1.4.2. Thermodynamique des milieux micromorphiques. 89

Chapitre 2. Modélisation du comportement thermomécanique endommageable des métaux 93

2.1. Sur les principaux schémas de modélisation du comportement des milieux continus matériellement simples. 95

2.2. Comportement et rupture des métaux et alliages. Sur quelques aspects physiques et phénoménologiques. 99

2.2.1. Sur la microstructure des métaux et alliages 100

2.2.2. Phénoménologie du comportement thermomécanique des polycristaux. 101

2.2.2.1. Comportement élastique linéaire. 102

2.2.2.2. Comportement inélastique 103

2.2.2.3. Comportement inélastique sensible à la vitesse de sollicitation 105

2.2.2.4. Anisotropies initiales et induites. 108

2.2.2.5. Autres phénomènes liés aux trajets de chargement 110

2.2.3. Phénoménologie de la rupture inélastique des métaux et alliages 115

2.2.3.1. Germination des microdéfauts 117

2.2.3.2. Croissance des microdéfauts 118

2.2.3.3. Coalescence des microdéfauts et rupture de l'EVV. 119

2.2.3.4. Sur une première définition de la variable endommagement 120

2.2.3.5. De l'endommagement ductile en un point matériel à la rupture totale d'une structure par propagation de fissures macroscopiques. 122

2.2.4. Synthèse des principaux phénomènes à modéliser 124

2.3. Cadre théorique de la modélisation et principales hypothèses 125

2.3.1. Principales hypothèses cinématiques 125

2.3.1.1. Choix de la cinématique et respect du principe d'objectivité. 126

2.3.1.2. Décomposition des taux des déformations 129

2.3.1.3. Sur quelques choix de référentiels tournants. 134

2.3.2. Mise en œuvre de la méthode de l'état local et principales hypothèses mécaniques.	138	2.5.3.2. Dissipation viscoplastique endommageable. Endommagement isotrope avec un potentiel viscoplastique unique et restauration	223
2.3.2.1. Choix des variables d'état associées aux phénomènes à modéliser	138	2.5.4. Remarque sur le choix des référentiels tournants	227
2.3.2.2. Définition des variables effectives. Fonctions effet d'endommagement.	145	2.5.5. Sur la modélisation de quelques effets particuliers liés aux comportements de matériaux métalliques	230
2.4. Potentiel d'état. Relations d'état	149	2.5.5.1. Effets des trajets de chargements non proportionnels sur l'évolution des écrouissages	231
2.4.1. Potentiel d'état en cas d'anisotropie de l'endommagement	150	2.5.5.2. Effets de mémoire de l'écrouissage	232
2.4.1.1. Formulation dans l'espace des déformations. Energie libre de Helmholtz	150	2.5.5.3. Déformation cumulative ou effet de rochet	232
2.4.1.2. Formulation dans l'espace des contraintes. Enthalpie libre de Gibbs.	158	2.5.5.4. Distorsion de la surface de charge et/ou du potentiel inélastique	233
2.4.2. Potentiel d'état en cas d'isotropie de l'endommagement.	161	2.5.5.5. Couplage viscosité-écrouissage. Description du pic de Probert-Liders	234
2.4.2.1. Formulation dans l'espace des déformations. Energie libre de Helmholtz	161	2.5.5.6. Prise en compte de la microstructure des matériaux	235
2.4.2.2. Formulation dans l'espace des contraintes. Enthalpie libre de Gibbs.	165	2.5.5.7. Quelques effets spécifiques sur la rupture ductile.	235
2.4.3. Fermeture des microfissures. Effet quasi unilatéral	166	2.6. Prise en compte d'une variation de volume induite par l'endommagement	235
2.4.3.1. Notion de fermeture des microdéfauts. Désactivation des effets de l'endommagement	166	2.6.1. Modélisation de la compressibilité induite par un endommagement isotrope.	236
2.4.3.2. Potentiel d'état avec effet quasi unilatéral	169	2.6.1.1. Notion d'endommagement volumique	237
2.5. Analyse des dissipations. Equations complémentaires	177	2.6.1.2. Couplage d'état et relations d'état	238
2.5.1. Analyse de la dissipation thermique. Equation généralisée de la chaleur.	178	2.6.1.3. Couplage des dissipations et relations complémentaires.	238
2.5.1.1. Vecteur flux de chaleur. Conduction linéaire de Fourier.	178	2.7. Modélisation du contact et frottement entre solides déformables	242
2.5.1.2. Equation généralisée de la chaleur.	179	2.7.1. Cinématique et conditions de contact entre solides	243
2.5.2. Analyse de la dissipation intrinsèque. Cas de la plasticité indépendante du temps.	181	2.7.1.1. Condition d'impenétrabilité des solides	245
2.5.2.1. Dissipation plastique endommageable. Endommagement anisotrope avec deux surfaces de charge.	182	2.7.1.2. Condition d'équilibre des efforts à l'interface de contact	246
2.5.2.2. Dissipation plastique endommageable. Endommagement anisotrope avec une seule surface de charge.	196	2.7.1.3. Condition de non-adhésion des surfaces de contact.	246
2.5.2.3. Dissipation plastique incompressible et endommageable. Endommagement isotrope avec deux surfaces de charge	201	2.7.1.4. Condition d'unilatéralité du contact.	247
2.5.2.4. Dissipation plastique incompressible et endommageable. Cas isotrope à une seule surface de charge.	208	2.7.2. Sur la modélisation du frottement entre solides en contact.	247
2.5.3. Analyse de la dissipation intrinsèque. Cas de la viscoplasticité ou plasticité dépendante du temps	214	2.7.2.1. Modèle de frottement de type plasticité indépendante du temps	248
2.5.3.1. Dissipation viscoplastique endommageable sans restauration. Endommagement anisotrope avec deux potentiels viscoplastiques	216	2.8. Modélisation non locale du comportement endommageable dans le cadre des milieux micromorphiques	257
		2.8.1. Principe des puissances virtuelles pour un milieu micromorphique. Equations de bilan	259
		2.8.2. Potentiel d'état et relations d'état pour un solide micromorphique	260
		2.8.3. Analyse des dissipations. Equations d'évolution pour un solide micromorphique	263

2.8.4. Opérateurs tangents continus 265

et admissibilité thermodynamique pour un solide micromorphique 265

2.8.5. Transformation des équations des bilans micromorphiques 266

Chapitre 3. Résolution numérique de problèmes de mise en forme des matériaux et des structures. 269

3.1. Problème de valeurs initiales et aux limites associé à la mise en forme des matériaux et des structures 270

3.1.1. Formes fortes du problème de valeurs initiales et aux limites 271

3.1.1.1. Pose du problème couplé 271

3.1.1.2. Remarques sur les conditions thermiques aux interfaces de contact 277

3.1.2. Formes faibles du problème de valeurs initiales et aux limites 279

3.1.2.1. Sur les diverses formes faibles du PVIL 279

3.1.2.2. Forme faible associée aux équations d'équilibre du solide 281

3.1.2.3. Forme faible associée à l'équation de la chaleur 284

3.1.2.4. Forme faible associée à l'endommagement micromorphique 285

3.1.2.5. Synthèse du problème d'évolution couplé 286

3.2. Discretisation temporelle et spatiale du PVIL 286

3.2.1. Discretisation temporelle du PVIL 286

3.2.2. Discretisation spatiale du PVIL par éléments finis 287

3.2.2.1. Semi-discretisation spatiale des formes faibles du PVIL 287

3.2.2.2. Exemples d'éléments finis isoparamétriques 294

3.3. Sur quelques schémas de résolution globale du PVIL 298

3.3.1. Schéma de résolution statique implicite 301

3.3.1.1. Schéma de Newton-Raphson pour la résolution du PVIL 301

3.3.1.2. Sur quelques critères de convergence 304

3.3.1.3. Calcul des différents termes de la matrice tangente 305

3.3.1.4. Matrice jacobéenne matérielle cohérente purement mécanique 309

3.3.1.5. Schéma de résolution globale implicite du PVIL couplé 311

3.3.2. Schéma de résolution dynamique explicite 313

3.3.2.1. Résolution du problème mécanique 314

3.3.2.2. Résolution du problème thermique (parabolique) 315

3.3.2.3. Résolution du problème d'endommagement micromorphique 317

3.3.2.4. Schéma séquentiel de résolution globale explicite du PVIL 318

3.3.3. Traitement numérique des conditions de contact-frottement 321

3.3.3.1. Méthode des multiplicateurs de Lagrange 322

3.3.3.2. Méthode de pénalité 325

3.3.3.3. Sur la recherche des nœuds de contact 326

3.3.3.4. Sur le traitement numérique de la condition d'incompressibilité 331

3.4. Schémas d'intégration locale : calcul des variables d'état 335

3.4.1. Sur l'intégration numérique par la méthode de Gauss 335

3.4.2. Intégration locale des équations de comportement. Calcul des contraintes et des variables d'état 336

3.4.2.1. Notion sur l'intégration numérique des EDO du premier ordre 337

3.4.2.2. Choix de modèles de comportement à intégrer 339

3.4.2.3. Intégration des équations de comportement plastique indépendant du temps. Cas d'un écoulement plastique isotrope de Von Mises 345

3.4.2.4. Intégration des équations de comportement plastique indépendante du temps. Cas d'un écoulement plastique anisotrope de Hill 358

3.4.2.5. Intégration des équations du modèle de comportement. Cas d'un écoulement viscoplastique 360

3.4.2.6. Calcul de la rotation. Objectivité incrémentale 366

3.4.2.7. Remarque sur l'intégration du modèle à endommagement micromorphique 368

3.4.3. Sur l'intégration locale des équations de frottement élasto-adaptative des structures élasto-inélastiques endommageables 371

3.5.1. Adaptation du pas de temps 373

3.5.2. Adaptation de la discrétisation spatiale 374

3.6. Sur d'autres méthodes de discrétisation spatiale du PVIL 381

3.6.1. Aperçu sur les méthodes dites sans maillage 383

3.6.2. Sur le couplage MEF-MSM 388

Chapitre 4. Application à la simulation numérique des procédés de mise en forme 391

4.1. Le formage virtuel, pourquoi ? 392

4.2. Identification des modèles 395

4.2.1. Etude paramétrique de quelques modèles particuliers 396

4.2.1.1. Choix d'un modèle de comportement type	397
4.2.1.2. Sollicitation de traction (compression) uniaxiale isotherme sans endommagement	401
4.2.1.3. Prise en compte de l'endommagement	422
4.2.1.4. Prise en compte de l'anisotropie initiale de l'écoulement inélastique	437
4.2.2. Méthodologie d'identification	456
4.2.2.1. Quelques généralités sur la problématique d'identification	456
4.2.2.2. Méthodologie d'identification préconisée	459
4.2.2.3. Illustration de la méthodologie d'identification	466
4.2.2.4. Cas du modèle non local	474
4.3. Application à la simulation numérique de quelques procédés de mise en forme de structures métalliques	475
4.3.1. Procédés de mise en forme de structures minces	476
4.3.1.1. Quelques procédés d'emboutissage de tôles minces	476
4.3.1.2. Quelques procédés de gonflement hydraulique de tôles et de tubes	488
4.3.1.3. Quelques procédés de découpage de structures minces	493
4.3.2. Procédés de mise en forme de structures massives	509
4.3.2.1. Procédés sous conditions normales	509
4.3.2.2. Procédés sous conditions sévères	522
4.4. Vers l'optimisation des procédés de fabrication et de mise en forme	531
Annexe. Transformation de Legendre-Fenchel	541
Bibliographie	547
Index	561

PROCÉDÉS ET SYSTÈMES MÉCANIQUES

Le traité Mécanique et Ingénierie des Matériaux répond au besoin de disposer d'un ensemble complet des connaissances et méthodes nécessaires à la maîtrise de ce domaine.

Conçu volontairement dans un esprit d'échange disciplinaire, le traité MIM est l'état de l'art dans les domaines suivants retenus par le comité scientifique :

Géomécanique

Matériaux

Environnement et risques

Chaque ouvrage présente aussi bien les aspects fondamentaux qu'expérimentaux. Une classification des différents articles contenus dans chacun, une bibliographie et un index détaillé orientent le lecteur vers ses points d'intérêt immédiats : celui-ci dispose ainsi d'un guide pour ses réflexions ou pour ses choix.

Les savoirs, théories et méthodes rassemblés dans chaque ouvrage ont été choisis pour leur pertinence dans l'avancée des connaissances ou pour la qualité des résultats obtenus.

